

非ニュートン流体中の気泡の挙動に関する研究

著者	辻野 智二
号	577
発行年	1981
URL	http://hdl.handle.net/10097/11526

氏 名	辻 野 智 二
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 56 年 11 月 11 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 46 年 3 月 岩手大学大学院工学研究科 機械工学第二専攻修士課程修了
学 位 論 文 題 目	非ニュートン流体中の気泡の挙動に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 嶋 章 東北大学教授 村井 等 東北大学教授 大場利三郎 東北大学教授 小林 陵二 東北大学教授 梅屋 薫

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

水にポリマーを添加することにより、キャビテーションの発生が抑制されることが明らかにされて以来、ポリマー水溶液中のキャビテーション現象が多く注目を集めている。キャビテーションは多くのパラメータが関与する複雑な流動現象であるが、ポリマー水溶液のような非ニュートン流体を作動流体とする場合には、さらに、非ニュートン特性にもとづく因子が加わるために、その解明ははなはだ困難であるといえる。しかし、非ニュートン流体中における気泡の力学を確立し、非ニュートン流体中の気泡の運動およびその際に発生する衝撃圧力などを明らかにすることによって、非ニュートン流体中のキャビテーション現象に関連する基礎的かつ有益な知見をうることができよう。

よって、本論文では、まずポリマー水溶液の非ニュートン流動特性を明らかにすることを目的として、各種ポリマー水溶液のレオロジーを円錐・円板型のレオメータを用いて実験的に解析し、ずり速度とずり応力との関係を表わすレオロジーモデルを作成・提案する。また、ポリマー水溶液の表面張力の測定を行うことにより、ポリマー濃度との関係を明らかにする。次に、得られたレオロジー式を用いて、ポリマー水溶液中の気泡の運動方程式ならびに圧力方程式を理論的に解

析し、気泡半径の時間的変化および衝撃圧力に及ぼすポリマー濃度、ポリマーの種類などの影響を明らかにする。

潤滑工学、流体工学などの分野の発展とともに、非ニュートン潤滑剤中のキャビテーション問題も最近の重要な研究課題の一つとなっている。ここでは、非ニュートン潤滑剤のレオロジーを良く表わす Sisko モデルを用いて気泡の挙動に関する理論解析を行い、非ニュートン潤滑剤中の気泡の運動を数値的に明らかにする。

最近のバイオメカニクスの分野では、特に血液の流動についての研究が重要視されており、気泡閉塞および溶血現象などの解明が強く望まれている。よって、本論文では血液中の気泡の挙動を理論的に解析し、気泡の運動方程式および気泡の固有振動数を与える式などを誘導する。さらに、数値計算を行うことにより、医学的疾患に関連する血液中の気泡の運動ならびに発生する圧力について考察する。

第 2 章 ポリマー水溶液のレオロジーならびに表面張力の測定とレオロジーモデルの提示

ポリマー水溶液で発生するキャビテーション現象の解明には、ポリマー水溶液のレオロジー挙動に関する知見が必要であるという観点から、本章ではポリエチレンオキサイド水溶液、ポリアクリルアミド水溶液、カルボキシメチルセルロース水溶液およびヒドロキシエチルセルロース水溶液の見掛け粘度 η ならびにずり応力 τ とずり速度 $\dot{\gamma}$ との関係を実験的に解析した。その結果、これらのポリマー水溶液は $\dot{\gamma}$ の増加とともに η が減少するずり流動化の現象を示すことを明らかにした。また、同一のポリマー濃度で $\dot{\gamma} \leq 10 \text{ sec}$ の範囲では、ポリアクリルアミド水溶液の見掛け粘度 η の値が最も大きく、ついで PEO 水溶液、CMC 水溶液の順となる。Polyox 水溶液、HEC 水溶液の η の値はほかのポリマー水溶液の場合よりも小さくなる。

ポリマー水溶液のレオロジーを良く表わすモデルとして次式を得た。

$$\tau = \left[\eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{(1 + \lambda |\dot{\gamma}|)^n} \right] \dot{\gamma} \quad (1)$$

ただし、 η_0 ：零ずり粘度、 η_{∞} ：極限粘度、 λ ：時間定数、 n ：物質定数

各種ポリマー水溶液の表面張力を測定することにより、次のことを明らかにした。水にポリエチレンオキサイドおよびヒドロキシエチルセルロースを微量添加することにより、表面張力は急激に低下する。表面張力に及ぼすポリアクリルアミドおよびカルボキシメチルセルロースの添加による影響は非常に小さい。

第 3 章 ポリマー水溶液中の気泡の挙動と発生する衝撃圧力

ポリマー水溶液中におけるキャビテーション気泡の挙動を明らかにするために、前章で得たレオロジーモデル(1)式を用いてポリマー水溶液中の球状ガス気泡が気泡内外の圧力差によって運動する場合の理論解析を行い、次の気泡の運動方程式および圧力方程式を導いた。

$$\begin{aligned}
\beta \frac{d^2 \beta}{d\tau^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{d\beta}{d\tau} \right)^2 = & \frac{q}{\beta^{3\gamma}} - 1 - \frac{C_3}{\beta} - \frac{C_0}{\beta} \frac{d\beta}{d\tau} - \frac{\frac{C_1}{\beta} \frac{d\beta}{d\tau}}{\left[1 + C_2 \left| \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{d\tau} \right| \right]^n} \\
+ n \frac{C_1}{C_2} \left| \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{d\tau} \right|^{-1} \cdot & \left(\frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{d\tau} \right) \left\{ \frac{1}{1-n} \left[1 - \left(1 + C_2 \left| \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{d\tau} \right| \right)^{1-n} \right] \right. \\
& \left. + \frac{1}{n} \left[1 - \frac{1}{\left(1 + C_2 \left| \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{d\tau} \right| \right)^n} \right] \right\} \quad (2)
\end{aligned}$$

および

$$\frac{P_w}{P_\infty} = \frac{q}{\beta^{3\gamma}} - \frac{C_3}{\beta} - \frac{C_0}{\beta} \frac{d\beta}{d\tau} - \frac{\frac{C_1}{\beta} \frac{d\beta}{d\tau}}{\left[1 + C_2 \left| \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{d\tau} \right| \right]^n} \quad (3)$$

ただし

$$\begin{aligned}
\beta &= \frac{R}{R_0}, \quad \tau = \frac{t}{R_0} \sqrt{\frac{P_\infty}{\rho_\ell}}, \quad q = \frac{P_0}{P_\infty}, \quad C_0 = \frac{M_0}{P_\infty} \left(\frac{1}{R_0} \sqrt{\frac{P_\infty}{\rho_\ell}} \right) \\
C_1 &= \frac{M_1}{P_\infty} \left(\frac{1}{R_0} \sqrt{\frac{P_\infty}{\rho_\ell}} \right), \quad C_2 = M_2 \left(\frac{1}{R_0} \sqrt{\frac{P_\infty}{\rho_\ell}} \right), \quad C_3 = \frac{2\sigma}{R_0 P_\infty}
\end{aligned}$$

$$M_0 = 4\eta_\infty, \quad M_1 = 4(\eta_0 - \eta_\infty), \quad M_2 = 2\sqrt{3}\lambda$$

および, R : 気泡半径, R_0 : 気泡初期半径, t : 時間, ρ_ℓ : ポリマー水溶液の密度, P_0 : 気泡内初期ガス圧力, P_∞ : 気泡より十分離れた点での圧力, σ : ポリマー水溶液の表面張力, γ : ポリトロップ指数, P_w : 気泡表面圧力

(2)式の数値解析を行うことにより, 各種ポリマー水溶液中の気泡半径の時間的変化の対比を行った。図1にその結果を示す。図より, PAM(N-110)が気泡の振動を最も強く減衰させること

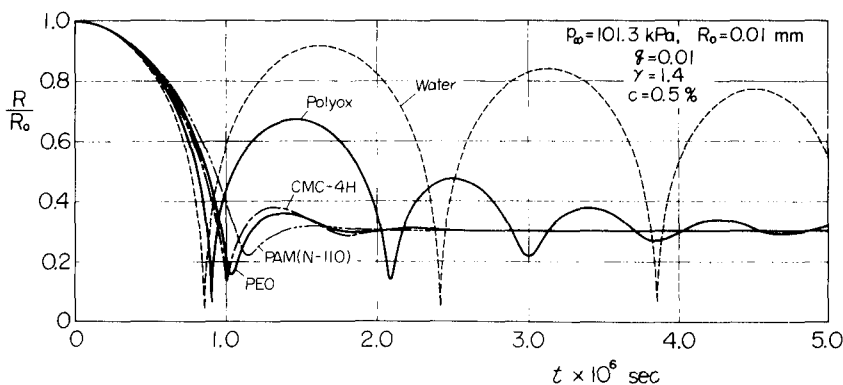


図1 各種ポリマー水溶液中における $R-t$ 曲線の比較

PEOおよびCMCも気泡の運動をかなり抑制することがわかる。Polyox 水溶液中の気泡径の時間的減衰はほかのポリマーの場合よりも小さい。

気泡崩壊の際に気泡表面上で発生する最大衝撃圧力 P_{\max} を各種ポリマー水溶液について求め、次のことを明らかにした。水にポリマーを添加することにより P_{\max} は減少する。このことから、ポリマー水溶液中でのキャビテーション損傷は水の場合よりも低下することが予測できる。また、PAMが P_{\max} を最も大きく減小させるポリマーである。

ポリマー水溶液中の気泡核が成長する際の臨界半径 R_c を求め、ポリマー水溶液中における R_c は水の場合よりも大きくなることを示した。このことは、ポリマー添加によるキャビテーション初生の抑制に対して一つの定性的説明を与える。

第4章 非ニュートン潤滑剤中の気泡の挙動

本章では、油圧機器ならびに軸受などで発生するキャビテーションに関連する研究として、非ニュートン潤滑剤中の気泡の挙動を理論的に考察した。

レオロジー式として、グリースおよび低温潤滑油のレオロジーを良く表わすSiskoモデルを用いて、気泡の運動方程式および圧力方程式を導いた。次に、得られた式の数値解析を行うことにより、グリースならびに低温原油（低温潤滑剤の代りとして）中における気泡半径の時間的変化、気泡表面での速度および圧力などを明らかにした。その結果、非ニュートン潤滑剤中におけるキャビテーション損傷に対しては、比較的大きな径の気泡の崩壊にともなう圧力がその要因となりうることを示した。

第5章 血液中の気泡の挙動

本章では、気泡閉塞、溶血現象および血液流中のキャビテーションなどに関する基礎的研究として、血液中の気泡の挙動を理論的に検討した。人間の血液のレオロジー挙動を良く表わすと言われているCassonモデルを用いて、血液中における球状ガス気泡の運動方程式、圧力方程式および気泡の固有振動数を与える式を誘導した。

数値計算例として、気泡内外の圧力比 $q = 2.0$ および 4.0 （潜水病、潜函病を想定）、 $q = 0.2$ および 0.5 （気圧治療法を想定）の各場合の気泡半径の時間的変化を明らかにした。また、溶血現象に関連する数値計算を脈動圧力の振動数 f_0 をパラメータとして行った。その結果、 $f_0 < f$ （気泡の固有振動数）の時、気泡は始め脈動圧力の影響によりある大きさまで成長するが、その後、気泡の固有振動に支配される。この場合、気泡の振動にともなうかなり高い衝撃的な圧力が発生する。 $f_0 \approx f$ の時、気泡の振動は脈動圧力の振動と気泡の固有振動の合成振動となり、この場合に生ずる圧力は図2(a)に示すごとく最も大きくなる。 $f_0 > f$ の時、気泡の振動は固有振動の影響を強く受け、振動の振幅は小さい。なお、この時の気泡表面の圧力変動は図2(b)に示すごとく非常に小さく、衝撃的な圧力は発生しない。

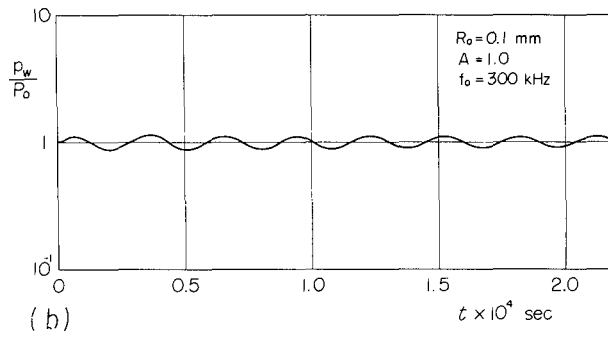
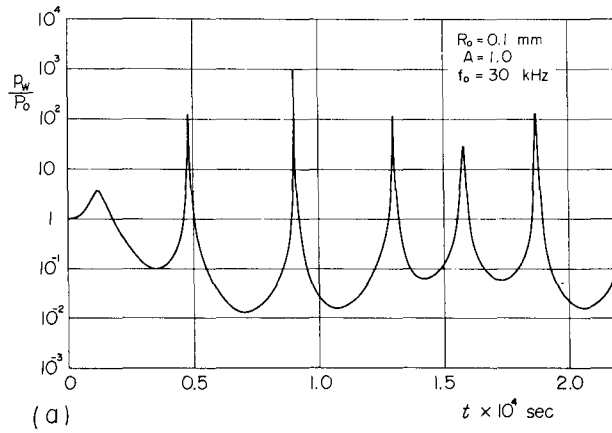


図2 血液中の気泡表面圧力の時間的変化

第6章 結 論

本研究では、各種非ニュートン流体中の気泡によって生ずる工学的ならびに医学的問題を気泡力学の観点から理論的に考究した。もって、第2章から第5章までの研究結果を総括し、結論とした。

審 査 結 果 の 要 旨

近年各種水力機械、油圧機器などの高速化ならびに汎用化により、水および油のキャビテーションの解明が強く要望されている。更に、水に少量のポリマーを添加したいわゆるポリマー水溶液および非ニュートン潤滑剤のキャビテーション問題が注目されている。一方、血液中における気泡の挙動に関する研究も重要となってきた。これらのキャビテーションの問題を根本的に解明するためには、まず気泡の発生機構、すなわち気泡の成長・崩壊を明らかにする必要がある。本論文はこの問題解決のために、従来ほとんどなされていなかった非ニュートン流体中の気泡挙動に関する系統的な研究を行って得た成果をまとめたもので全文6章よりなる。

第1章は緒論である。第2章は種々なるポリマー水溶液のレオロジーを円すい・円板型のレオメータを用いて実験的に解明すると共に、これらのポリマー水溶液の流動を良く表わすレオロジーモデルを作成、提案している。これによって、気泡の挙動を理論的に究明することを可能とし、この結果は第3章における解析の基礎となっている。

第3章では、前章で得られたレオロジーモデルを用いて、ポリマー水溶液中における気泡の運動方程式および圧力方程式を導き、数値解析を行っている。その結果、ポリマー水溶液中の気泡は、水の場合と比較して、気泡径の時間的減衰が大きいことおよび気泡より発生する衝撃圧力が低下することを示すと共に、ポリマーの添加がキャビテーション損傷を軽減することを予測している。また、ポリマーの添加によってキャビテーションの発生が抑制されるという実験的事実に対して、一つの定性的な説明を得ている。これらは有用な知見である。

第4章では、非ニュートン潤滑剤のレオロジーを表わすSiskoモデルを用いて解析を行い、グリースならびに低温原油中の気泡の挙動を数値的に明らかにし、もって、非ニュートン潤滑剤中のキャビテーション現象に関する一寄与を得ている。

第5章では、人間の血液のレオロジーを良く表すCassonモデルを用いて、理論解析を行い、血液中の気泡の運動方程式および圧力方程式を導いている。更に、得られた式の数値計算により、脈動圧力を受ける血液中の気泡の振動ならびにその際の気泡表面圧力などを明らかにし、これらの結果と医学的疾患との関係について考察を行っている。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文はポリマー水溶液、非ニュートン潤滑剤、血液などの非ニュートン流体中の気泡の挙動について、理論的に詳細に解析し、キャビテーション発生機構ならびに損傷機構に関して有用な知見を加えたもので、流体工学、油圧工学および生体工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。